2001년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 2001.7.18-20

회전자 형상 변화에 따른 스위치드 릴럭턴스 전동기의 특성 해석

°임승빈*, 박종원*, 최재학*, 전연도*, 김윤현*, 이주*
한양대학교 전기공학과 *

Analysis of Characteristics in Switched Reluctance Motor According to the Variation of Rotor Shape

°S. B. Lim*, J. W. Park*, J. H. Choi*, Y. D. Chun*, Y. H. Kim*, J. Lee*
*Dept. of Electrical Engineering, in Hanyang University

Abstract - This paper presents an analysis of the characteristics in switched reluctance motor (SRM). 2D finite element method (FEM) considering the iron saturation and the actual switching circuit of the SRM drive is applied for the dynamic analysis. The influence of the rotor shape on the radial force and torque ripple is investigated and the optimal shape of rotor pole is proposed to enhance the torque. The radial force characteristics acting on the surface of teeth is investigated by using the Maxwell's magnetic stress tensor method.

1. 서 론

스위치드 릴럭턴스 전동기(SRM)는 단위 중량당 토크가 크고, 유도기나 영구자석 전동기와 비교하여 구조가 간단하여 유지, 보수가 쉽고, 영구자석이 없으므로 열에 강한 장점을 가지고 있으며, 최근 전력전자 기술의 급속한 발달에 따라 가전분야 및 산업분야에서의 구동원으로서 크게 주목받고 있다 [1]. 또한 유한요소법에 기초한 수치해석 기술의 발달에 따른 설계기술의 향상 및 센서, 제어 기술 등의 진보에 따라 많은 성능 향상이 이루어지고 있다.

그러나 SRM는 고정자와 회전자의 이중 돌극 구조이며, 펄스형태의 구동이므로 근본적으로 토크 맥동이 크고 소음과 진동이 심하다는 단점이 있다. 따라서 SRM을 범용성을 가지고 산업 전분야에 확대 적용하기 위해서는 토크 맥동을 감소시켜 소음 진동 문제를 해결해야만 하며 이를 위한 전동기 설계와 구동 방법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

소음, 진동의 원인은 크게 전자기적 요인과 기계적 요인으로 나눌 수 있으며, 전자기적 요인의 경우 모터의 고정자에 작용하는 전자기적인 힘이 구동 토크를 발생시키고 동시에 radial force density가 가진력이 되어 고정자를 진동시킨다. 특히 외부가진력의 진동수가 기계의 고유진동수와 일치할 때 공진현상에 의해 전동기 부품의 마모 및 과도한 소음을 유발하게 된다. 따라서 SRM의 의 진동해석에 있어서는 외부가진력 즉 radial force density의 정확한 분석이 필수적이다 [2].

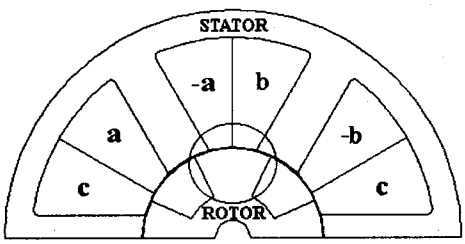
소음 진동의 원인이 되는 토크 맥동을 저감하기 위한 방법으로서 SRM의 기하학적 파라메터인 고정자 극호(β_s)와 회전자 극호(β_r)의 형상을 변경하거나 전기적 파라메터인 턴온 각과 턴오프 각을 조정하는 방법 등이 제시되고 있다 [3][4].

본 논문에서는 회전자의 극호는 고정시킨 상태에서 회전자의 측면 형상을 변화시켜 SRM의 토크 및 힘 특성에 미치는 영향을 살펴보았다. SRM의 정확한 해석을 위해서 구동회로를 고려한 2차원 유한요소법을 사용하였으며 인덕턴스 증가구간에서 평활전류가 흐르도록 최적의 턴온 각을 계산하여 토크 맥동을 최소화 하도록 하였다.

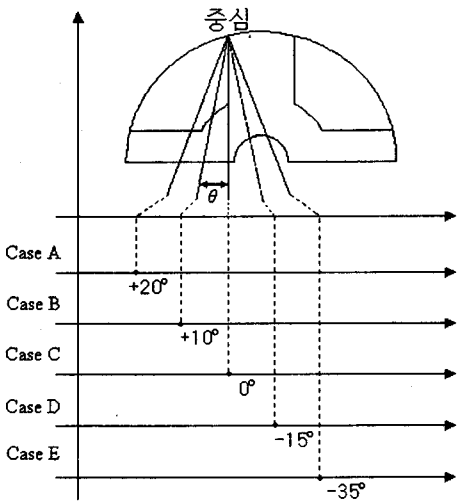
2. 본 론

2.1 해석모델

그림 1은 해석모델의 단면도로서 이중 돌극형 스위치드 릴럭턴스 전동기이다. 6개의 고정자와 4개의 회전자로 이루어져 있고 회전자 극호와 고정자 극호가 각각 30° , 50° 이다. 회전자의 형상에 따른 토크 및 전류특성을 고찰하기 위해 회전자의 극호는 고정한 상태에서 회전자의 측면을 각각 다섯 가지의 형상으로(Case A: θ = +20° , Case B: θ = +10° , Case C: θ = 0° , Case D: θ = -15° , Case E: θ = -35°) 나누어 특성을 비교하였다. 여기서 θ가 양인 경우는 회전자의 측면을 바깥쪽으로 넓힌 경우이고 음인 경우는 회전자의 측면을 안쪽으로 좁힌 경우이다. 표 1은 스위치드 릴럭턴스 전동기의 주요 사양이며 그림 2는 3상 SRM의 구동회로를 나타내고 있다.



(a) SRM 반모델



(b) 각도에 따른 회전자 형상

그림 1. SRM 모델과 회전자 형상

표 1. 모델 사양

항목	값	단위	항목	값	단위
정격전압	12	V	공극 길이	0.3	mm
정격전류	2	A	적층폭	40	mm
턴수	90	T/pole	코일 선경	0.7	mm
고정자 극수	6	poles	권선저항	1	Ω
회전자 극수	4	poles	코어 재질	S18	
동작 속도	1000	rpm			

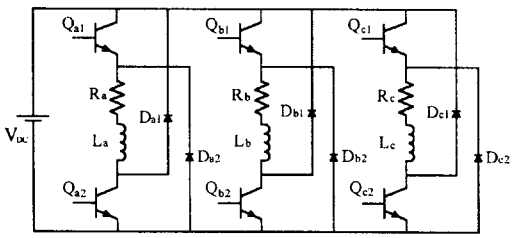


그림 2. 3상 SRM의 구동회로

2.2 유한요소법 정식화

자기 벡터 포텐셜과 전류밀도가 Z축 성분만 존재한다면 스위치드 릴럭턴스 전동기의 지배방정식은 자기 벡터 포텐셜을 사용하여 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$\partial/\partial x(\nu\partial A/\partial x)+\partial/\partial y(\nu\partial A/\partial y)+J_0=0 \qquad (1)$$

여기서 ν는 투자율의 역수, A는 자기벡터포텐셜, J_0는 입력 전류밀도이다.
또한 구동회로의 전압방정식은 식 (2)와 같이 표현된다.

$$V=R_m I+L_m(dI_m/dt)+E_m \qquad (2)$$

여기서 V는 입력전압, R_m은 상저항, L_m은 코일단부의 누설리액턴스, E_m은 코일에서 발생되는 역기전력이다.

식(1)에 Gelerkin 법을 적용시키고 전압방정식 (2)를 결합시키면 후퇴차분법을 이용한 시스템 방정식은 식 (3)과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{bmatrix} [S] & [Q] \\ (1/\Delta t)\times[F] & [R_m] \end{bmatrix}\begin{bmatrix} A^{t+\Delta t} \\ I_m^{t+\Delta t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ (1/\Delta t)\times[F] & 0 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} A^{t} \\ I_m^{t} \end{bmatrix}+\begin{bmatrix} 0 \\ V^{t+\Delta t} \end{bmatrix} \qquad (3)$$

2.3 스위칭 각의 결정

회전자와 고정자에서 극호(arc)길이와 형상의 함수로부터 토크 맥동을 줄이기 위한 평활 전류를 흘리는 턴 온각과 턴 오프각을 결정하였다. 그림 3에서 나타낸 턴 온각과 턴 오프각은 Case C에서 계산된 최적의 값이고 동일조건에서 회전자의 형상 변화에 따른 특성변화를 비교하기 위하여 Case A, B, D, E에도 같은 턴 온각과 턴 오프각을 적용하였다. 본 논문의 해석 모델은 회전자와 고정자의 극호 길이는 모두 같지만 그 형상이 다르기 때문에 평활 전류가 흐르는 최적의 온 각은 모두 조금씩 다르므로 Case A, B, D, E 에서는 평활한 전류가 흐르지 않는다. 식(4)와 식(5)는 평활전류가 흐르는 턴 온각과 턴 오프각의 계산 수식을 나타내고 있다.

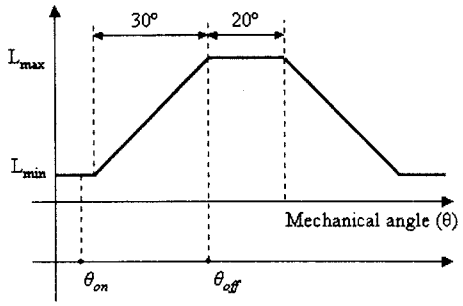


그림 3. 인덕턴스 프로파일과 스위칭 각

$$\theta_{on}=\theta_{b2}+\omega\frac{L_{\min}}{R}\ln\left(1-R/\left(R+\frac{dL}{d\theta}\omega\right)\right)\frac{180}{\pi} \qquad (4)$$

$$\theta_{off}=\theta_{b1}+\omega\frac{L_t}{R}\ln\left(\frac{R+dL/d\theta\cdot\omega}{2R+dL/d\theta\cdot\omega}\right)\frac{180}{\pi} \qquad (5)$$

여기서 $L_{\min}$은 최소 인덕턴스, L_t는 턴 오프 때의 인덕턴스, R은 상저항, ω는 각속도, θ는 회전자 위치, θ_{b2}는 인덕턴스가 상승되는 시점이고 θ_{b1}는 인덕턴스의 하강시작점이다.

회전자의 극호 범위는 식(4)와 식(5)를 이용하면 식(6)으로 결정된다.

$$\beta_s=30^\circ,\ \Delta\theta_q+30^\circ\le\beta_r\le 60^\circ-\Delta\theta_{ad} \qquad (6)$$

여기서 $\Delta\theta_{ad}\equiv\theta_{b2}-\theta_{on}$와 $\Delta\theta_q\equiv\theta_{off}-\theta_{b1}$라고 정의하면 회전자 극호의 범위는 식(6)과 같이 결정되며, 회전자의 극호는 60°로 계산되었으나 돌극형 구조를 유지하기 위해 본 논문에서는 회전자 극호를 50°로 결정하였다.

3. 해석 결과

그림 4는 회전자 형상에 따른 다섯 가지 경우의 전류 파형을 비교한 것으로 턴 온각과 턴 오프각은 Case C에서 구한 값을 사용하였다. 해석 결과로부터 회전자의 측면 형상을 -θ 방향으로 증가시킬수록 전류의 상승폭이 커짐을 알 수 있었다.

그림 5는 맥스웰 응력법을 사용하여 구한 방사방향의 힘(Radial Force)의 특성 비교를 나타내고 있으며 방사방향 힘의 평균값이 가장 큰 Case E와 가장 작은 Case A의 차는 0.26%로 근소한 차이를 가지고 있다.

그림 6은 접선방향의 힘(Tangential Force)의 특성 비교를 나타내고 있으며 회전자를 -θ 방향으로 증가시킬수록 접선방향 힘의 평균값과 첨두값이 크며 턴 오프시에는 전류가 부토크 영역을 넘어서 75°부근에서 마이너스 방향의 힘이 발생하였다. Case E와 Case A의 경우, 평균값은 약 24%의 차이를 나타내고 있으며 이러한 결과로부터 토크 특성 또한 Case E가 가장 좋다는 것을 알 수 있다.

그림 7은 토크 특성의 비교를 나타내고 있다. Case E의 경우가 평균토크의 값이 가장 크게 나타났으며 Case A와 비교하여 약 24% 증가하였다.

4. 결 론

본 논문에서는 소음 진동의 원인이 되는 토크 맥동을 저감하기 위한 방법으로서 회전자의 극호는 고정시킨 상태에서 회전자의 측면 형상을 변화시켜 SRM의 토크 특성에 미치는 영향을 살펴보았다. SRM의 정확한 해석을 위해서 구동회로를 고려한 2차원 유한요소법을 사용하였으며 인덕턴스 증가구간에서 평활전류가 흐르도록 최적의 턴온 각을 계산하여 토크 맥동을 최소화 하도록 하였다. 해석결과로부터, 회전자의 측면형상을 $-\theta$ 방향으로 35° 감소시킨 Case E에서 최대의 접선방향의 힘과 최대 평균토크의 특성을 얻을 수 있었고 $+\theta$ 방향으로 증가시킨 경우 토크 및 접선방향의 힘의 크기가 줄어드는 것을 알 수 있었다. 따라서 SRM의 설계시 회전자의 극호가 결정되었을 때, 회전자의 측면을 안쪽으로 깍아서 감소시키는 것이 보다 좋은 특성을 얻을 수 있으며 이러한 결과는 SRM의 설계시 유용한 자료가 될 것으로 사료된다.

[후 기]

이 연구는 한국과학재단 지정 국제공동연구(과제번호:1-00-047)의 지원에 의해 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

[1] T.J.E Miller, "Switched Reluctance Motors and Their Control," Oxford Magna Physics Publishing and Clarendon Press, 1993.

[2] R. Arumugam, D.A Lowther, R. Krishnan and J.F. Lindsay, "Magnetic Field Analysis of a Switched Reluctance Motor using a Two Dimensional Finite Element", *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. MAG-21, no. 5, pp.1883-1885, 1985.

[3] M. Gabsi, F. Camus, B. Humeau and M. Besbes, "Vibration in the switched reluctance motor, influence of the feeding mode," Proceedings of Europena Conference on the Power Electronics and Applicaitons, vol. 2, pp. 495-499, 1997.

[4] M. Besbes, C. Picod, F. Camus and M. Gabsi, "Influence of stator geometry upon vibratory behaviour and electromagnetic performances of switched reluctance motors," IEE Proceedings Electr. Power Appl., vol. 145, no. 5, pp. 462-468, 1998.

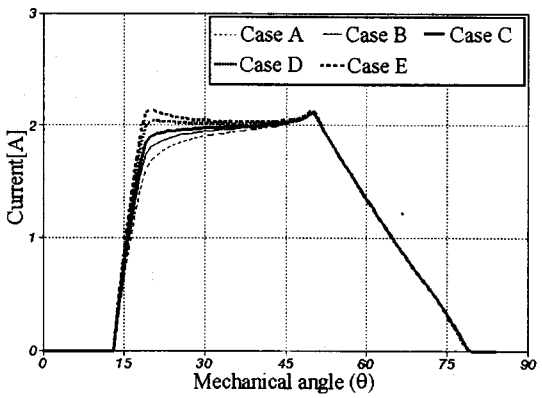


그림 4. 전류 파형

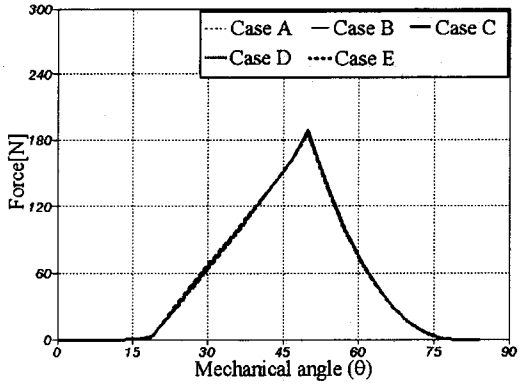


그림 5. Radial Force 파형

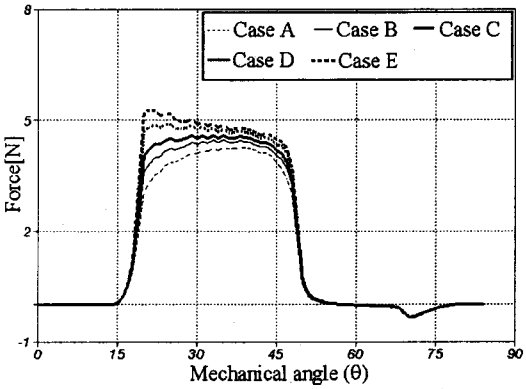


그림 6. Tangential Force 파형

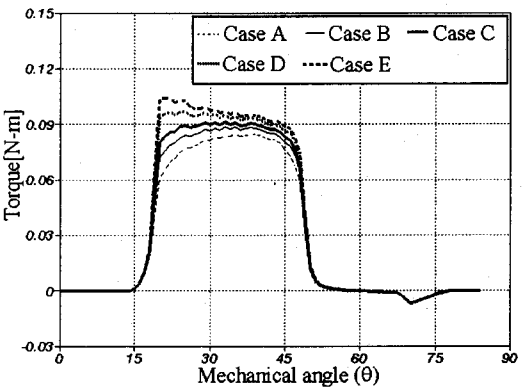


그림 7. Torque 파형